水稻精準農業體系
由植被高解析反射光譜模式化水稻之產量
25-34, 2003

由植被高解析反射光譜模式化水稻之產量

陳榮坤*、楊純明
行政院農業委員會農業試驗所農藝組
E-mail: rkuen@wufeng.tari.gov.tw

摘要 ---------- 26
一、前言 ---------- 26
二、方法簡述 ---------- 28
三、結果與討論 ---------- 29
四、結語 ---------- 31
五、誌謝 ---------- 32
六、引用文獻 ---------- 32
ABSTRACT ---------- 34

由植被高解析反射光譜模式化水稻之產量

陳榮坤*、楊純明
行政院農業委員會農業試驗所農藝組
E-mail: rkuen@wufeng.tari.gov.tw

摘要

爲利用光譜遙測技術具有之非破壞性而即時大面積快速偵測優點，必先瞭解被測物反射光譜特性及其外觀物理徵狀與光譜特徵之關係，同時建立對應之光譜特徵模式，才能據以進行監測而提供被測物的現況資訊。本研究以不等氮肥施用量處理來建構不同植被狀態及產量表現之水稻族群，以探討標準差植被指數(normalized difference vegetation index, NDVI；或稱正規差植生指數)、葉面積指數(leaf area index, LAI)及產量間的關係，試以利用植被高解析反射光譜模式化水稻的產量。試驗發現水稻全生育期的 NDVI 及 LAI 在不同年度和期作均呈現凸形曲線分佈，而 NDVI 與 LAI 之間則呈現指數曲線關係($R^2=0.601$, $P<0.0001$)，顯示由 NDVI 及 LAI 相互推估的可行性。又比較抽穗期間量測的 LAI 與水稻產量之關係，發現水稻產量可利用抽穗期間的 LAI 予以預測，其中一期稻作爲抽穗前後 15 天之累加 LAI 或平均 LAI，二期作則爲抽穗前 15 天與抽穗後 10 天之累加 LAI 或平均 LAI。綜合本研究結果，顯示可藉由水稻生育期間光譜遙測資料計算的 NDVI 推估當時的 LAI，再以抽穗期間 LAI 進行對產量的預測，達到利用光譜遙測技術在追蹤水稻族群生長狀態及預測產量的目的。惟試驗亦發現，由於 NDVI 與 LAI 的指數關係，限制了在高 NDVI 臨界值的使用。

關鍵詞： 遙測、標準差植被指數、葉面積指數、產量、模式化。

一、前言

經過近三十年的長期研究，目前已可藉由光譜遙測技術進行對農作物生長發育的即時監測，藉由比較或分析作物植被反射光譜的光譜特徵變化，來辨識與判讀受測植被當時所處的狀態。此一光譜遙測技術的發展在農業上具有廣泛的應用潛力與價值，吾人可據以從事地面植被種類的探索，觀測作物相的分佈、作物種類占有的面積、植被覆蓋比率及生長狀態等，獲得作物生產過程中的各樣即時資訊。如此，非但有利於作物生產的規畫及經營管理，更提供予採行適當的因應措施與策略，達到穩定農作物生產及提升品質的目的。

自從 1972 年美國大地衛星 Landsat 發射升空以來，針對地表狀態進行的各種理論與實務的研究，即在世界各地蓬勃的進展。植被光譜分析技術亦隨著探討地表植被光學特性與植被狀態的關係，不斷的演進與改良，其中尤

以植被指數(vegetation index, VI；或稱植生指數)的光譜分析方法和應用最爲普遍。植被指數的邏輯係建立在光譜特徵與作物植被外觀物理徵狀存在的對應關係，將量測的植被光譜中篩選出少數幾個(通常爲 1-3 個)不同光譜特徵波段予以數學組合，以降低不確定的環境因素(如土壤背景、光源入射角或大氣干擾等)(Bouman, 1995)。通常這些特徵波段多以可見光(400-700 nm 或 400-740 nm)及近紅外光(700-1300 nm)範圍爲主，因爲作物植被在可見光波段反射的強弱反應了光合容量及光合活力大小，在近紅外光反射的多寡則對照出作物細胞活性、植被覆蓋率高低及幾何構造的複雜程度。因此高近紅外光反射比及低可見光反射比的反射光譜，代表該作物族群擁有較佳的綠色植被覆蓋率。自 1974 年 Rouse *et al.*提出以 NDVI 估測植體狀態的可行性後，標準差植被指數即成爲被廣泛使用於監測植被狀態的植被指數之一，其由紅光(R_{RED})及近紅外光(R_{NIR})二個窄波段所組成，計算公式爲 $(R_{NIR}-R_{RED})/(R_{NIR}+R_{RED})$。當作物族群擁有較佳光合活力的綠色植被覆蓋率，NDVI 將趨近於 1，反之則趨近於 0(Rouse *el al.*, 1974)。由於植被指數的簡便計算方法，到目前爲止仍爲專家學者進行植被光譜研究時的常用指標或參考指數，研究指出其對於植體的活力、生質量、水分逆境、葉面積指數(leaf area index, LAI)及產量等(Bouman *et al.*, 1992; Clevers, 1989; Gong *et al.*, 1995; Holben *et al.*, 1980; Leblon *et al.*, 1991; Patel *et al.*, 1985; Wooten *et al.*, 1999)均有良好的相關性。然而，NDVI 仍然可能受到地面背景的干擾，如土壤水分含量的變化、化學物質的施用狀況或耕作環境的差異(Koller and Upadhyaya, 2001)等，故其應用有一定限制。

產量的估測與預測在農作物生產過程中是非常重要的，早期的產量預測具有期貨商品的經濟效益，也可以反饋調節當時作物生長狀態的經營管理，以增進農作生產的最大利益。後期的產量估測，可以讓生產者獲得未來實際產量的估值，也可以讓田間管理者評估栽培過程的良窳，作爲下期作改進的考量。無論是產量預測或估測資訊，均可提供政府擬訂及施行農業政策時的參考，並藉以調節市場供需而穩定農產品價格和維護農民權益。當然作物產量的預測或估測在實務上並非易事，因爲作物的生育表現隨環境變化而異，而且時間及空間的變異也必然帶來實測值與預測值之間的差異。更何況現行的農耕操作乃採行固定的栽培管理模式，未能依照農田各定點的變異實施差異性對應處理的精準管理作業，產量的空間變異分佈是可期的，甚至出現相當的差距。儘管如此，倘能建立機制式模式，以即時現況資訊作爲輸入減少環境變異的誤差，仍可能獲得客觀而令人接受的產量估測與預測值。

光譜遙測技術的發展，使得作物生長狀態得以即時獲知，並可據以建立具有理論邏輯基礎的光譜特徵模式，正好連接其中的斷層成爲後期估測與早期預測產量的有用工具。因此，許多專家學者致力於植被光譜與作物產量關係的研究，如 Ma *et al.* (1996)在探討植被光譜與玉米全生育期生植體乾物重及子實產量之間的關係時，發現玉米開花前的植被光譜對於田間綠色植體鮮重(biomass)及收穫時的子實產量呈現高度相關性，顯示利用玉米開花前的植被光譜於預測其子實產量的可行性。Gopalapillai *et al.* (1998)進一步指出，玉米種植後 75 天的植被光譜與氮肥施用量及產量具有高度相關，而且可以利用紅光波段的植被光譜反射率預測子實產量。Ma *et al.* (2001)在利用大豆生育初期(R2-R5)的植被反射光譜進行產量預測時，發現 NDVI 與大豆產量具有良好的相關性。

水稻是臺灣地區栽培面積最大、產值最高

的糧食作物，在水稻生產過程中，若能結合光譜遙測技術進行水稻族群生長狀態監測與產量估(預)測，將有助於降低生產成本及維持穩定的產量與品質。本研究於是在一、二期稻作栽培時，利用不等氮肥施用等級建構出水稻族群間的差異性，以取得廣大差異分佈的 NDVI、LAI 及稻穀產量資訊。除了建立 NDVI 與 LAI 間的關係模式，更藉由 LAI 與產量間的密切相關，使得吾人得以由 NDVI 間接推估水稻產量。再由尋找出估(預)測水稻產量的適當時期，達到利用光譜遙測技術即時估(預)測水稻產量的目的。

二、方法簡述

本研究於 2001-2002 年在臺中縣霧峰鄉行政院農業委員會農業試驗所農場進行田間試驗，每年兩期作，共四期稻作，以提供作為 LAI 的取樣估算、近地面植被光譜量測及產量調查的水稻族群來源。參試水稻(*Oryza sativa*)品種爲臺農 67 號，一期稻作分別施予 0、30、60、90、120、150 及 180 kg ha^{-1} 等七種不等氮肥施用等級，二期稻作則無 180 kg ha^{-1} 之氮肥施用等級。2001 年一期稻作在 2 月 27 日移植機插， 6 月 19 日收穫，生育日數共 113 天；二期稻作於 8 月 6 日移植機插，11 月 21 日收穫，生育日數爲 108 天。2002 年一期作於 2 月 27 日移植機插，6 月 17 日收穫，生育日數共 111 天；二期作於 8 月 5 日移植機插，11 月 19 日收穫，生育日數爲 107 天。試驗期間栽培方法採用慣行法，以南北向機械插秧，每叢 3-5 株，行株距約爲 0.30 m × 0.15 m。農藥施用視病蟲草害發生狀況而定，除草劑部分係以 5%丁基拉草粒劑 30 kg ha^{-1} 於插秧一週內施用防除禾本科雜草，以 44.1%本達隆溶液 3 L ha^{-1} 劑量 200 倍稀釋液於移植後第三週防除鴨舌草及螢藺等雜草，再於插秧後約一個月實施人工除草一次。

爲探討 LAI 對於預測稻穀產量的適當時期，於水稻全生育期間監測不同氮肥施用等級對於 LAI 的消長情形，自稻苗移植後約每隔一～二週取樣一次，至收穫爲止。各小區取樣 6 叢稻株以估測 LAI，將每叢稻株綠色葉片剪下後，以面積測定儀(area meter; model LI-3000A, Li-Cor, Lincoln, NE, USA)測定葉片表面積，再利用行株距換算爲 LAI(每平方公尺土地面積上的葉片表面積，$m^2\ m^{-2}$)。收穫時於各小區收取 10 m^2 的稻株，以調查不等氮肥施用變級之稻穀產量。將各小區在水稻不同生育時期之 LAI、累加 LAI(accumulated LAI)及平均 LAI(mean LAI)對各小區之產量進行迴歸分析，以獲得決定係數(determining factor, R^2)。其中累加 LAI 及平均 LAI 分別是在某一段期間(20-40)天內，以水稻抽穗期爲基準之不同天數組合的 LAI 累加量及 LAI 平均數值。

水稻族群植被反射光譜配合稻叢葉面積取樣約每隔一～二週測量一次，以田間攜帶式輻射光譜分析儀(spectroradiometer，model GER-2600，Geophysical & Environmental Research Corp., Millbrook, NY, USA)進行光輻射(radiance)測定。植被光譜反射比係由目標植被區之光輻射除以同波長之已知反射光譜特性的標準白板('Spectralon', Labsphere, Inc., North Sutton, NH, U.S.A.)反射光輻射(即參考值)來計算。將光譜分析儀連接筆記型電腦，並藉由電腦中內建的 GER 程式(GER-2600 User Manual, 1996)進行植被反射光譜的量測操作。植被反射光譜量測波長範圍爲 330-2600 nm，光輻射掃描器爲 10 度視角(FOV)，固定於距離植被約 5.8 m 之高空作業車上垂直偵測反射光譜。每一塊田區逢機量測 15 定點，每一定點預設爲 4 次掃描之平均値，取 15 定點均値爲該區代表值。光輻射量測時間於上午十時至下午一時之間，選擇晴朗無雲時段偵測，

以減少太陽入射角及遮雲的干擾。由於稻株生育初期的植被尚未完全覆蓋地表，植被反射光譜將受到土壤及灌溉水影響，因此本研究僅使用未受水分及土表干擾的光譜曲線測點。

爲計算 NDVI，乃篩檢各氮肥變級的水稻族群植被反射光譜曲線的紅光波段(640-740 nm)谷點(RED)及近紅外光波段(740-1300 nm)頂點(NIR)反射比，以取得(R_{NIR}-R_{RED})/(R_{NIR}+R_{RED})計算值在全生育期變化分佈。並對 NDVI 與 LAI 之間建立關係模式，期以利用 NDVI 估測 LAI。又如能合併不同期作資料建立適用於一、二期稻作的 NDVI 與 LAI 關係模式，將可提升此項關係模式的適用範圍，因此將兩期作的 NDVI 與 LAI 資料分別定義爲虛擬變數(dummy variable)檢定，以 SAS 8.2 進行不同期作迴歸曲線的差異性檢定，作爲不同期稻作間資料合併與否依據。

三、結果與討論

作物的生長發育主要受到其本身遺傳形質及栽培環境的影響，無論是遺傳形質或栽培環境的差異，均會造成植株生長不一及光合作用能力消長，最終表現在作物產量上。因此，利用光合作用容量(潛力)來評估單一品種的作物產量，是合適而有效率的方法之一。作物群落的單位土地面積光合作用量可以藉由單葉光合作用平均速率、LAI 及受光係數(extinction coefficient)等三個構成因子的乘積組成表示(Murata, 1975)，其中單葉光合作用平均速率及受光係數主要受遺傳因子的影響，而 LAI 受栽培環境的影響最大。因此，LAI 即成爲單一品種產量表現的主要因子，即反應環境對產量潛能影響的主要單一因子，這也是多數學術研究中經常使用 LAI 的原因。通常作物之 LAI 愈大，表示愈能有效利用光能進行光合產物的合成及累積，因而可預定較高的產量生成。然而，當 LAI 過大，導致葉面積過多、葉片相互遮陰時，將降低整體植株的光能擷取效率，進而影響同化物質的生產與累積。因此，LAI 與產量爲一曲線關係，將在 LAI 達到臨界高值後達到飽和，甚至由於維持呼吸的能量消耗而呈現下降趨勢。換言之，作物葉面積的增加相對於達到最大乾物質的累積速率有其最適 LAI(optimum leaf area index)，以收穫種子爲主的作物來說，其最適 LAI 約在 3～5 之間(Gardner *et al.*, 1985)。

本研究以不等氮肥施用級差建構出不同 LAI 及產量的水稻族群，因而亦獲得變異分佈的 NDVI。LAI 及 NDVI 在二年四期稻作間的分佈如圖 1 所示，自插秧移植後隨著分蘗數增加及葉片伸展，使得 LAI 逐漸增加，約於抽穗前後達到最高值，之後隨著生育進展及老化過程而漸趨下降，在全生育期間呈現凸形曲線。NDVI 的表現類似於 LAI，一如稻株的生育及植被覆蓋的變化，亦呈現凸形曲線趨勢。由圖 1 發現，無論是一期稻作或二期稻作，氮肥施用量愈高則 LAI 及 NDVI 值愈大。惟在相同氮肥施用等級之下，一期稻作的 LAI 及 NDVI 在不同栽培年度間均高於二期作，顯示兩期稻作受到不同的環境影響，亦反映出一、二期稻作在環境上的差異。Houng(1979)曾指出，水稻不同期作間的氮素吸收速率並無顯著差異，然而在相同的田間管理措施下，二期稻作顯然受到氣候環境的影響而造成較低的 LAI。經過許多專家學者的長期研究，如今已知道臺灣的二期稻作生育初期高溫環境是造成稻株分蘗能力受到抑制的原因，並將因促進稻株快速生長而縮短營養生長期(Lin, 1979)。由於 LAI 與分蘗數爲正比關係，因而造成二期稻作呈現較低的 LAI，以及較低的 NDVI。

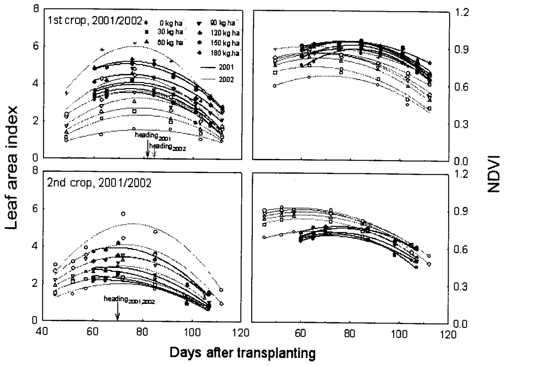

圖 1. 2001-2002 **年水稻不同期作之** LAI **與** NDVI **在全生育期間的分佈。**

Fig. 1. Changes of leaf area index (LAI) and normalized difference vegetation index (NDVI) as a function of time after transplanting for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. TNG 67) grown in the first and the second cropping seasons of 2001 and 2002.

LAI 及 NDVI 的關係，可以由各年度不同期作的 LAI 與 NDVI 關係圖的繪製呈現(圖 2)。可以明顯看出，LAI 及 NDVI 在不同期作之間均呈現指數型曲線關係，此結果與 Yang *et al.* (1999)的報告相似。爲增加 LAI 及 NDVI 關係模式在不同期作間的適用性，再利用虛擬變數進行兩期稻作間關係曲線的差異性檢定，發現 LAI 及 NDVI 的關係模式並未因期作別而有顯著差異，乃進而合併不同期作資料以得到同時適用於兩期稻作的迴歸模式，其決定係數(R^2)大於 0.6 ($P<0.0001$)，顯示 NDVI 及 LAI 互爲良好的預測性能。Gong *et al.*(1995)研究指出，在許多作物中 NDVI 是 LAI 的適用指標，而且可以據以 NDVI 推估 LAI。Aman *et al.*(1992)的報告也指出 NDVI 可對 LAI 進行良好的預測，在 LAI<3 時，NDVI 與 LAI 幾乎呈現正直線關係。因此，本研究中 NDVI 及 LAI 在水稻全生育期間伴隨改變是合理的結果，惟在高 LAI 數値 NDVI 的反應將變得遲頓，顯示當 LAI 達到臨界高値後將造成 NDVI 的飽和。因此，在應用 LAI 和 NDVI 之間的關係模式時，必須注意 LAI 的臨界飽和點，以及採用之 NDVI 極限值。

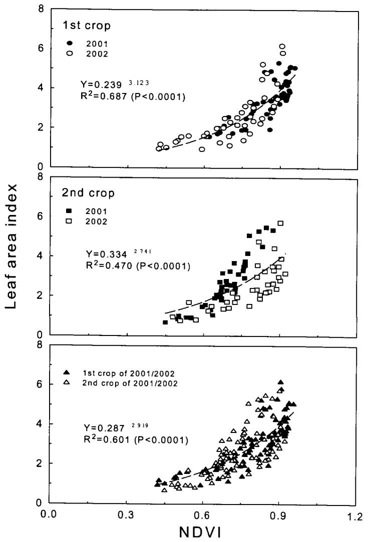

圖 2. 2001-2002 **年水稻不同期作之** LAI **與** NDVI **的關係。**

Fig. 2. The exponential relationships between leaf area index (LAI) and normalized difference vegetation index (NDVI) for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. TNG 67) grown in the first and the second cropping seasons of 2001 and 2002.

進一步將二年四期稻作的 LAI 及 NDVI 變化範圍分析於表 1，顯示水稻族群最大 LAI 値約介於 5.5-6.2 之間，而最大 NDVI 約在 0.89-0.93 的範圍內。此外，在一期稻作中，2001 年的最大 LAI 値爲 5.6，低於 2002 年的 LAI(6.2)，但其對應之 NDVI 值(0.93)卻高於 2002 年的 0.91，顯示 NDVI 與 LAI 之間的關係似乎仍然受到環境的影響而出現差異，並非是固定的比例關係。環境的影響因素可能是氣象因子，也可能是病蟲害，尤其當病蟲源造成葉片顯現部分黃化或斑點時，雖然不影響 LAI 的調查，卻可能反應於 NDVI 的量測而產生落差。Sellers(1985)曾指出，NDVI 雖然對於作物的光合作用能力具有線性關係，卻非 LAI 與生質量的良好估測指標。所以，LAI 與 NDVI

的關係可能因作物種類而異，亦可能受到環境的影響而有所差別(Baret and Guyot, 1991; Best and Harlan, 1985; Wanjura and Hatfield, 1987)。

表 1. 2001-2002 年水稻不同期作生育期間 LAI 與 NDVI 之極小及極大値。

Table 1. The minimum and maximum values of leaf area index (LAI) and normalized difference vegetation index (NDVI) for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. TNG 67) grown in the first and the second cropping seasons of 2001 and 2002.

Cropping season	Minimum LAI	Maximum LAI	Minimum NDVI	Maximum NDVI
First Crops				
2001	1.6	5.6	0.61	0.93
2002	0.9	6.2	0.42	0.91
Second Crop				
2001	0.6	5.5	0.45	0.89
2002	0.8	5.7	0.51	0.92

爲瞭解水稻族群 LAI 與產量間的關係，利用不等氮肥施用變級之全生育期模式化 LAI 值與產量進行相關分析，結果如圖 3 所示。研究顯示在水稻不同年度及期作間，LAI 與產量在全生育期間的相關性(R^2)均在 0.73 以上。不同年度及期作間仍可顯現出相關性的高低差異，尤以 2001 年一期稻作的相關性最低，可能與氣候環境或病蟲草害的影響有關，尚待查證。Shieh (1978)曾指出，LAI 對於水稻產量及抽穗時的植株全乾物重呈現正比關係，其抽穗前與抽穗後到稻穀黃熟期之間的光合作用量，是支配乾物質生產及穀實產量的最重要因素，且抽穗後 LAI 的維持時間，即葉面積持續期(leaf area duration)愈大，愈有利於產量的提升。因此，爲定義出 LAI 對產量預測的適當時段，以水稻抽穗期爲基準，利用不同天數組合(20-40 天)的模式化 LAI 累加量及 LAI 平均數值對於產量進行相關性分析(結果未列出)。結果發現利用水稻 LAI 預測產量的適當時期，在一期作爲抽穗前後 15 天的累加 LAI(R^2=0.84-0.96) 或平均 LAI(R^2=0.85-0.97)，二期作爲抽穗前 15 天至抽穗後 10 天的累加 LAI(R^2=0.93-0.98) 或平均 LAI (R^2=0.93-0.99)。顯示無論在一期稻作或二期稻作，水稻產量均可藉由抽穗期間的 LAI 值進行估測。惟欲獲得準確估值，仍須考量氣候環境對作物生產的影響，加入影響參數才能提高估測準確性。

四、結語

綜合本研究結果顯示，當建立水稻族群植被之 NDVI 與 LAI 的關係模式後，即可藉由模式相互推估兩項參數的估值，因而瞭解 LAI 的變化對 NDVI 的影響，以及由 NDVI 去追蹤 LAI 的改變。而當完成解析 LAI 與產量的關係後，則可利用 NDVI 經由對 LAI 的估算來預測未來的水稻產量，如此即可進行破壞性的大面積快速產量預測工作。這些資訊的綜合運用並得以提供資訊予生產者和田間管理者，使之瞭解栽培作物的生長現況，據以實施適當的管理措施，獲得農作生產的最大利益。然而，由於 NDVI 與 LAI 爲指數形曲線關係，受到迴歸模式中飽和度問題的限制，對於 NDVI 的使用應該謹慎。在未來的研究中，作者將在 NDVI、LAI 及產量間的相互關係中，增加不同期作、年度及栽培地區的資料，以提升預測模式對於不同栽培環境的適用廣度。

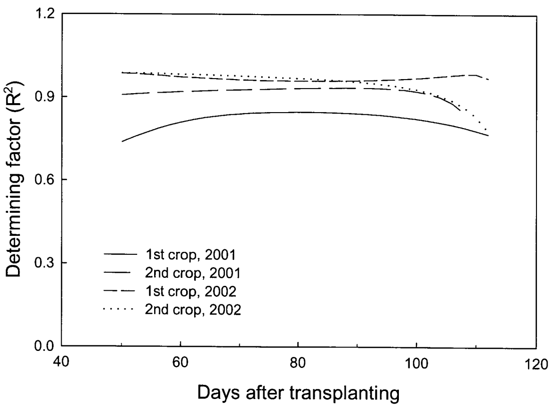

圖3. 2001-2002年水稻不同期作之LAI與產量的關係。

Fig. 3. Changes of the determining factor for the relationships between grain yield and LAI for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. TNG 67) grown in the first and the second cropping seasons of 2001 and 2002.

五、誌謝

本項研究承蒙行政院農業委員會農業試驗所經費(89 遙測-4.1-糧-41(Z), 90 農科-4.1.1-農-C2(Z), 91 農科-5.1.3-農-C2(Z), 92 農科-1.1.6-農 C1(Z))支持，謹藉以表示由衷感謝。

六、引用文獻

Aman, A., H.P. Randriamanantena, A. Podaire and R. Forouin. 1992. Upscale Integration of Normalized Difference Vegetation Index: The problem of spatial heterogeneity. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 30:326-338.

Baret, F. and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sens. Environ. 35:161-173.

Best, R.G. and J.C. Harlan. 1985. Spectral estimation of green leaf area index of oats. Remote Sens. Environ. 17:27-36.

Bouman, B.A.M. 1995. Crop modeling and remote sensing for yield prediction. Netherlands J. Agric. Sci. 43:413-161.

Bouman, B.A.M., H.W.J. van Kasteren and D. Uenk. 1992. Standard relations to estimate ground cover and LAI of agricultural crops from reflectance measurements. Eur. J. Agric. 1:249-262.

Clevers, J.P.G.W. 1989. The application of a weighted infrared vegetation index for estimating leaf area index by correcting soil moisture. Remote Sens. Environ. 29:25-37.

Gardner, F.P., R.B. Pearce and R.L. Mitchell. 1985. Physiology of crop plants. p.204. Iowa State University Press, U.S.A.

Gong, P., P. Ruiliang and J.R. Miller. 1995. Coniferous forest leaf area index estimation along the Oregon transect using compact airborne spectrographic imager data. PE&RS. 61(9):1107-1117.

Gopalapillai, S., L. Tian and J. Beal. 1998. Detection of nitrogen stress in corn using digital aerial imaging. ASAE Paper No. 983030. St. Joseph, Mich., ASAE.

Holben, B.N., C.J. Tucker and C.J. Fan. 1980. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. Photogramm. eng. remote sensing. 46:651-656.

Houng K. H. 1979. Efficiency of nitrogen fertilization on the yield of the first and second rice crops. (in Chinese) p.133-140. *In*:Proceedings of the Symposium on the Causes of Low Yield of the Second Crop Rice in Taiwan and the Measures for Improvement. Held at Taiwan Agricultural Research Institute on 7-8 June 1978. Published by National Science Council, Taipei.

Koller, M. and S.K. Upadhyaya. 2001. Relationship between a soil adjusted vegetation index and processing tomato yield. Proceedings of 2001 ASAE Annual Meeting, Paper No.011143. St. Joseph, MI, USA.

Leblon, B., M. Guerif and F. Baret. 1991. The use of remotely sensed data in estimation of PAR use efficiency and biomass production of flooded rice. Remote Sens. Environ. 38:147-158.

Lin A.C. 1979. Comparison on the photosynthesis under community conditions between the first and second crops of rice. (in Chinese) p.85-90. *In*:Proceedings of the Symposium on the Causes of Low Yield of the Second Crop Rice in Taiwan and the Measures for Improvement. Held at Taiwan Agricultural Research Institute on 7-8 June 1978. Published by National Science Council, Taipei.

Ma, B.L., L.M. Dwyer, C. Costa, E.R. Cober and M.J. Morrison. 2001. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. Agron. J. 93:1227-1234.

Ma, B.L., M.J. Morrison and L.M. Dwyer. 1996. Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of maize. Agronomy J. 88(6):915-920.

Murata, Y. 1975. The effect of solar radiation, temperature and aging on net assimilation rate of crop stands-from analysis of the “Maximal Growth Rate Experiment” of IBP/PP. Proc. Crop. Sci. Soc. Japan. 44:153-159.

Patel, N.K., T.P. Singh, B. Sahai and M.S. Patel. 1985. Spectral response of rice crop and its relation to yield and yield attributes. Intl. J. Remote Sens. 6:657-664.

Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering and J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradition (greenwave effect) of natural vegetation, NASA/GSFC Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA. 1-371.

SAS Institute. 1998. SAS/STAT user's guide. Version 8.1. SAS Inst., Cary, NC, USA.

Sellers, P.J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. Intl. J. Remote Sens. 6(8):1335-1372.

Shieh, Y.J. 1978. Growth and community photosynthesis of rice plants in the first and second crop seasons. (in Chinese) p.91-100. *In*:Proceedings of the Symposium on the Causes of Low Yield of the Second Crop Rice in Taiwan and the Measures for Improvement. Held at Taiwan Agricultural Research Institute on 7-8 June 1978. Published by National Science Council, Taipei.

Wanjura, D.F., and J.L. Hatfield. 1987. Sensitivity of spectral vegetation indices to crop biomass. Trans. ASAE 30:810-816.

Wooten, J.R., D.C. Akins, J.A. Thomasson, S.A. Shearer and D.A. Pennington. 1999. Satellite imagery for crop stress and yield prediction: cotton in Mississippi. ASAE Paper No. 991133. St. Joseph, MI, USA.

Yang, C.M. and M.R. Su. 1999. Modeling rice growth from characteristics of reflectance spectra. p.735-740. *In*:Proceedings of the 20th Asian Conference on Remote Sensing. 22-25 November 1999, Hong Kong.

Modeling Rice Yield Using Hyperspectral Reflectance Data

Rong-Kuen Chen* and Chwen-Ming Yang
Division of Agronomy, Agricultural Research Institute, COA, Taichung,Taiwan, ROC
E-mail: rkuen@wufeng.tari.gov.tw

ABSTRACT

The optical properties of target canopy and the relationships between spectral characteristics and biophysical characters of crop should be clarified and well defined before using the advantages of spectral remote sensing to nondestructively detect and monitoring the timely information of growth status over large area. This study used different nitrogen fertilizer application rates to establish varied canopy status and yield performance so as to investigate the relations among normalized difference vegetation index (NDVI), leaf area index (LAI) and rice yield, and to modeling rice yield from ground-based remotely sensed hyperspectral reflectance data. It showed that changes of NDVI and LAI during the growing periods of rice, both in the first cropping and the second cropping seasons, were a sigmoidal pattern with the maximum observed near heading. The relationship between NDVI and LAI was fitted to an exponential function (R^2=0.601, P<0.0001), indicating that NDVI and LAI may be mutually estimated. By comparing the values of LAI before and after heading with yields at harvest, it was found that rice yield may be assessed from LAI near heading. For the first crops. the mean and the accumulated LAI from 15 days before heading to 15 days after heading were closely correlated to yield. It was the mean and the accumulated LAI from 15 days before heading to 10 days after heading showing close relation to yield for the second crops. Results from this study suggest that NDVI calculated from reflectance spectra measured during rice growth may be used to estimate LAI, which collect near heading may then be used to predict yield at harvest. However, the exponential function of NDVI and LAI limits the application of these two parameters in the upper end of the curve where the 'saturation effects' occur and NDVI was insensitive to change of LAI.

Key wrods: Remote sensing, Normalized difference vegetation index, Leaf area index, Yield, Modeling.